

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19920101152789

UDC_____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

基于有磁芯螺线管验证位移电流的方向

Verification experiment of the direction of the displacement
currents by core solenoid

朱金攀

指导教师姓名: 翁梓华 教授

专 业 名 称: 仪器仪表工程

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 6 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 6 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（翁梓华）课题组的研究成果，获得（翁梓华）课题（组）经费或实验室的资助，在（物理馆 310）实验室完成。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

在实验上直接地验证位移电流的幅值和方向是人们长期以来的奋斗目标。近年来随着测量技术的发展使这种可能性逐步地成为现实。一些学者已经在实验上直接地测量了位移电流的幅值。但目前仅限于位移电流幅值的测量，从未测量过位移电流的方向。本课题组于 2010 年首先提出在实验中直接测量位移电流的方向的设想，随后提出了几个实验方案并开展了相关的实验研究。

本文采用两种实验方案验证位移电流的方向。分别采用 Fammeter 传感器(方案一)和单个微晶磁芯传感器(方案二)直接测量在钛酸钡电容器中产生的位移电流方向。在以往的研究中，Fammeter 传感器已经测量了传导电流的幅值和方向，以及位移电流的幅值，由此判断它也可用于测量位移电流的方向。类似地，单个坡莫合金磁芯传感器已经测量了位移电流的幅值，预测性能更好的单个微晶磁芯传感器可用于同时测量位移电流的幅值和方向。通过与传导电流方向的对比，判断出位移电流方向。

由于激发的位移电流十分微弱，实验中影响其相位的因素很多。实验组主要考虑以下影响因素并展开研究：1) 电容器极板电压值；2) 电容器电介质材料及其介电常数；3) 螺线管的匝数；4) 螺线管的磁芯材料及其磁导率；5) 磁屏蔽材料及其屏蔽效果；6) 测量频率限制及其范围；7) 寄生元件及其分布参数；8) 磁芯对相位的影响；9) 螺线管对相位的影响；10) 电容器对相位的影响；11) 变压器对相位的影响。

实验结果显示，方案一中的 Fammeter 传感器的灵敏度可以达到 μA ，能够检测出钛酸钡陶瓷电容器所激发的位移电流。在 3KHz-50KHz 频率范围内，以传导电流的实验结果为基准，方案一确认了位移电流的方向与经典电磁场理论的预测是一致的。在 100Hz-2KHz 频率范围内，以传导电流的实验结果为基准，方案二确认了位移电流的方向与经典电磁理论的预测是一致的。位移电流的方向测量实验将完善对麦克斯韦理论及其位移电流的深入认识，这对电磁场理论的进一步发展起到了一定的促进作用。

关键词：位移电流方向；相位影响因素；电磁场理论

ABSTRACT

It is a long-term efforts target to verify directly the displacement current in experiment. In recent years, with the development of testing techniques, It becomes possible to directly measure the displacement currents. Some scholars have directly measured the magnitude of the displacement current in experiment. However, they merely validate the amplitude of the displacement current, but never try to validate the orientation of displacement current in the experiment. In 2010, the experimental groups firstly proposed the idea of directly measuring the orientation of the displacement currents. Subsequently, we propose several experimental methods and carried out experimental studies.

In this paper, we use two experimental methods to verify the direction of the displacement current. The experiment groups use Fammeter sensor (method 1) and single microcrystalline core sensor (method 2) to directly measure the direction of the displacement current in the barium titanate capacitors. In past studies, Fammeter sensor not only measured the amplitude and direction of conduction current but also measured the amplitude of the displacement currents, so classifying it is also possible to measure the direction of the displacement current. Similarly, the single Permalloy core sensor has measured the amplitude of the displacement current, we predict single crystallite core sensor (better performance) can be used to simultaneously measure the amplitude and direction of the displacement current. Comparing with the direction of conduction direction, we confirm the direction of the displacement current.

Since the displacement current is very weak, there are a lot of factors may affect the phase in experiment. The experimental groups consider the following influencing factors and carry out research: 1) The voltage value of the capacitor plates; 2) The dielectric material of capacitor and its dielectric constant; 3) The turns of the solenoid; 4) The solenoid core material and its magnetic permeability; 5) Magnetic shielding material and its shielding effect; 6) The measured frequency limit and scope; 7) Parasitic elements and their distribution parameters; 8) The phase affected by core;

9) The phase affected by solenoid; 10) The phase affected by capacitors; 11) The phase affected by transformer

Experimental results show that, in the first experimental method, the sensitivity of Fammeter sensor can be achieved μA , which can detect the displacement currents in the barium titanate ceramic capacitor. In the 3KHz-50KHz frequency range, As a reference to conduction current experimental results, experimental method 1 Verified that the direction of displacement current is consistent with classical electromagnetic theory predicted. In the second experimental method, As a reference to conduction current experimental results, experimental method 1 Verified that the direction of displacement current is consistent with classical electromagnetic theory predicted in the frequency 100Hz-2KHz range. The direction of displacement current as same as classical electromagnetic theory predicted. The experiment will improve the In-depth understanding of Maxwell's theory and its displacement current. This will play a certain role in promoting the further development of the theory of electromagnetic field.

Keywords: displacement current direction ; phase influencing factors ; electromagnetic field theory

目 录

摘 要.....	I
第一章 绪 论	1
1.1 位移电流.....	1
1.1.1 位移电流的概念	1
1.1.2 麦克斯韦方程组和位移电流	1
1.1.3 平行板电容器中位移电流的分布	4
1.2 位移电流的方向验证.....	5
1.2.1 位移电流的方向	5
1.2.2 国内外研究现状	6
1.2.3 研究的意义	7
1.3 本文的主要研究内容.....	8
1.3.1 总体实验思想	8
1.3.2 主要研究内容	8
1.4 本章小结.....	9
第二章 位移电流方向验证方案	10
2.1 实验方案一及原理.....	10
2.1.1 实验框架	10
2.1.2 实验原理	12
2.1.3 传感器工作原理	13
2.1.4 实验技术路线图	14
2.2 实验方案二.....	15
2.2.1 实验框架	15
2.2.2 实验介绍	15
2.2.3 实验原理	16
2.3 实验装置介绍.....	17
2.3.1 装置的规格及型号	17
2.3.2 钛酸钡陶瓷电容器	18
2.4 实验要点.....	19
2.4.1 理论依据	19
2.4.2 实验的重点及关键	19
2.5 本章小结.....	20
第三章 Fammeter 传感器.....	21
3.1 磁芯材料的选择.....	21
3.1.1 磁性材料的分类	21
3.1.2 非晶磁芯	23
3.1.3 微晶磁芯	25
3.2 磁滞回线的测量.....	27

3.2.1 示波器法测量原理	27
3.2.2 示波器上的波形转换	28
3.2.3 测量结果分析	30
3.2.4 通入外加电流磁滞回线上的反应	33
3.3 磁芯的配对	34
3.3.1 非晶磁芯配对的过程	34
3.3.2 微晶磁芯的配对过程	37
3.4 Fammeter 传感器的制作	38
3.5 本章小结	39
第四章 装置的屏蔽	40
4.1 静电屏蔽	40
4.1.1 静电屏蔽原理	41
4.1.2 静电屏蔽应用	41
4.1.3 静电屏蔽装置	42
4.1.4 与磁屏蔽、电磁屏蔽的关系	43
4.2 电磁屏蔽	44
4.2.1 电磁屏蔽原理	44
4.2.2 影响电磁屏蔽的几个要素	45
4.2.3 电磁屏蔽设计	46
4.3 磁屏蔽	47
4.3.1 磁屏蔽原理	47
4.3.2 磁屏蔽的设计要点	48
4.3.3 屏蔽罩的制作	49
4.4 总屏蔽装置	52
4.5 本章小结	53
第五章 实验方案—结果分析	54
5.1 灵敏度的测量	54
5.1.1 非晶磁芯传感器灵敏度	54
5.1.2 微晶磁芯传感器灵敏度	57
5.2 幅值不同，传导电流的相移	60
5.2.1 非晶磁芯传感器	60
5.2.2 微晶磁芯传感器	61
5.3 感应的幅值大小	63
5.3.1 位移电流的幅值	63
5.3.2 理论电压幅值	64
5.3.3 微晶磁芯传感器感应的幅值	66
5.3.4 非晶磁芯传感器感应的幅值	67
5.4 实验的影响因素	67
5.4.1 功放对相位的影响	67
5.4.2 屏蔽前后对相位的影响	68
5.4.3 位移电流与传导电流激发的磁场等效性	72
5.4.4 其它影响因素	73

5.5 位移电流的方向	74
5.5.1 非晶磁芯传感器实验结果	74
5.5.2 微晶磁芯传感器实验结果	76
5.6 本章小结	78
第六章 实验方案二结果分析	79
6.1 实验操作	79
6.1.1 两级放大后电压值	79
6.1.2 两级放大对相位的影响	81
6.2 实验数据分析	82
6.2.1 感应波形与频率的关系	82
6.2.2 实验中参数的确定	84
6.2.3 实验的可重复性	86
6.3 非晶磁芯实验结果	87
6.3.1 线圈匝数与感应最大值时的频率的关系	87
6.3.2 匝数为 813 匝位移电流的相位	88
6.3.3 匝数为 284 匝位移电流的相位	90
6.3.4 各匝数相位统计结果	91
6.4 微晶磁芯实验结果	92
6.4.1 线圈匝数为 537 匝时结果	92
6.4.2 线圈匝数为 150 匝时结果	94
6.4.3 各匝数位移电流方向的测量结果	95
6.5 屏蔽罩改进后实验结果	96
6.5.1 线圈匝数为 103 匝实验结果	96
6.5.2 相位与匝数、频率的关系	98
6.5.3 各匝数实验结果	99
6.6 本章小结	100
第七章 结论与展望	101
参考文献	103
攻读硕士学位期间的论文	107
致 谢	108
附录：实验设备、样品和平台	109

CONTENTS

ABSTRACT.....	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Displacement current.....	1
1.1.1 the concept of the displacement current	1
1.1.2 Maxwell's equations and the displacement current	1
1.1.3 the displacement current in Parallel plate	4
1.2 Verification of Displacement current's direction	5
1.2.1 The direction of the displacement currents.....	5
1.2.2 Research status at home and abroad	6
1.2.3 The significance of the study	7
1.3 The Main contents of this paper	8
1.3.1 The experimental philosophy	8
1.3.2 The Main research content.....	8
1.4 Summary	9
Chapter 2 The authentication scheme	10
2.1 the first Experimental program and principles	10
2.1.1 Experimental framework.....	10
2.1.2 Experimental principle	12
2.1.3 the sensor Working Principle	13
2.1.4 Experimental Technology Roadmap.....	14
2.2 the second Experimental program	15
2.2.1 Experimental framework	15
2.2.2 Experimental introduction	15
2.2.3 Experimental principle	16
2.3 Experimental apparatus.....	17
2.3.1 Specifications and model of the device	17
2.3.2 Barium titanate ceramic capacitors.....	18
2.4 The experimental points	19
2.4.1 Theoretical basis	19
2.4.2 The focus of the experiment	19
2.5 Summary.....	20
Chapter 3 Fammeter sensor.....	21
3.1 The choice of the core material.....	21
3.1.1 Magnetic classification	21
3.1.2 Classification of soft magnetic materials.....	23
3.1.3 Amorphous and microcrystalline.....	25
3.2 Hysteresis loop measurements	27
3.2.1 Oscilloscope measurement principle	27

3.2.2 Waveform conversion	28
3.2.3 Measurement results	30
3.2.4 the reaction when Pass into the impressed current	33
3.3 Pairing of the core	34
3.3.1 Amorphous core pairing process	34
3.3.2 The microcrystalline core pairing process	37
3.4 Designing Fammeter Sensor	38
3.5 Summary	39
Chapter 4 Shielding of the device	40
4.1 Electrostatic shielding	40
4.1.1 The principle of electrostatic shielding	41
4.1.2 Electrostatic shielding applications	41
4.1.3 Electrostatic shielding device	42
4.1.4 Relationship between the magnetic shielding, electromagnetic shielding	43
4.2 Electromagnetic shielding	44
4.2.1 The principle of Electromagnetic shielding	44
4.2.2 Several factors affect the electromagnetic shielding	45
4.2.3 Electromagnetic shielding design	46
4.3 Magnetic shielding	47
4.3.1 The principle of magnetic shielding	47
4.3.2 the design points of Magnetic shielding	48
4.3.3 The design magnetic shield means	49
4.4 The total shielding device	52
4.5 Summary	53
Chapter 5 The first experimental results	54
5.1 the sensitivity of the sensor	54
5.1.1 Amorphous core sensor sensitivity	54
5.1.2 The microcrystalline core sensor sensitivity	57
5.2 The amplitude of the applied current impact phase	60
5.2.1 Amorphous core sensor	60
5.2.2 Microcrystalline core sensor	61
5.3 The induced voltage	63
5.3.1 the voltage of the displacement current	63
5.3.2 Theoretical voltage amplitude	64
5.3.3 The sensing voltage of microcrystalline core sensor	66
5.3.4 The sensing voltage of Amorphous core sensor	67
5.4 The factors of impacting the experiment	67
5.4.1 Power amplifier	67
5.4.2 Shielded before and after	68
5.4.3 Excitation magnetic field equivalence	72
5.4.4 Other factors	73

5.5 The direction of the displacement current	74
5.5.1 Amorphous core sensor experimental results	74
5.5.2 Microcrystalline core sensor experimental results	76
5.6 Summary.....	78
Chapter 6 The second experimental results	79
6.1 Experimental operation.....	79
6.1.1 Two-stage amplified voltage value	79
6.1.2 the phase effect of Two-stage amplification	81
6.2 Analysis of experimental data.....	82
6.2.1 The relationship between the induction waveform and frequency	82
6.2.2 Determine the parameters	83
6.2.3 The repeatability	86
6.3 Amorphous core experimental results	87
6.3.1 the relationship between the frequency and turns.....	87
6.3.2 the phase of the displacement current when 813 turns	88
6.3.3 the phase of the displacement current when 284 turns	90
6.3.4 the phase statistical results.....	91
6.4 Microcrystalline core experimental results	92
6.4.1 the phase of the displacement current when 537 turns	92
6.4.2 the phase of the displacement current when 150 turns	94
6.4.3 the phase statistical results.....	95
6.5 the results after shield improved	96
6.5.1 the experimental results when 103 turns	96
6.5.2 the Relationship between Phase and turns, Frequency	98
6.5.3 the phase statistical results.....	99
6.6 Summary.....	100
Chapter 7 Conclusions and Prospections	101
References	103
Publications	107
Acknowledgements	108
Appendix: Experimental Equipment.....	109

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪 论

1861 年,麦克斯韦第一次提出了位移电流的概念,认为安培环路定理只有加入位移电流这一项,才可使之与法拉第电磁感应定律具有对称性。1862 年,他发表了《论物理的力线》的重要论文,进一步论述了他引入的位移电流的概念。1865 年他发表了第三篇电磁学论文《电磁场的一个动力学理论》。在这篇文章中,麦克斯韦总结了前人 100 多年以来的研究和他自己对电磁理论的研究成果,采用位移电流假设和场论观点,提出了“电磁场理论”。

位移电流的引入不但保证了电流的连续性,使麦克斯韦得以建立的四个方程成为了自洽的关于电磁场的完整理论体系,还把原来相互独立的三个重要的物理学研究领域:电学、磁学和光学结合起来,实现了物理学上的又一次大的综合。这创举现在已被物理学术界公认为物理学史的重大里程碑。位移电流对于电磁波的存在是基要的。

1.1 位移电流

1.1.1 位移电流的概念

位移电流是一种特殊的电流,是麦克斯韦为解决矛盾以假说形式首先提出的。位移电流是电位移矢量随时间的变化率对曲面的积分。但位移电流只表示电场的变化率,它不产生热效应、化学效应等。继电磁感应现象发现之后麦克斯韦的这一假设更加深入一步揭示了电现象与磁现象之间的联系。位移电流是建立麦克斯韦方程组的一个重要依据。

在电磁学里,位移电流(displacement current)定义为电位移通量对于时间的变率。位移电流的单位与电流的单位相同。如同真实的电流,位移电流也有一个伴随的磁场。但是,位移电流并不是移动的电荷所形成的电流,而是电位移通量对于时间的偏导数。

1.1.2 麦克斯韦方程组和位移电流

麦克斯韦在前人的基础上,把由实验得出的电磁学加以总结和推广,而得出

他的电磁场方程组的。他引用的初始实验定律是库伦定律·法拉第电磁感应定律·毕奥-萨伐尔定律。他的推广有两个方面：其一是假定变化的电场产生磁场，从而把安培定律加以推广，使之包含位移电流；其二是假定变化的磁场产生电场，从而把法拉第电磁感应定律由导体回路中产生感应电动势，推广到一般情况。

麦克斯韦方程组的积分形式：

$$\left\{ \begin{array}{l} \oiint_S D \cdot dS = q \quad (1-1) \\ \oiint_S B \cdot dS = 0 \quad (1-2) \\ \oint_L E \cdot dl = - \iint_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (1-3) \\ \oint_L H \cdot dl = I + \iint_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS \quad (1-4) \end{array} \right.$$

这是 1873 年前后，麦克斯韦提出的表述电磁场普遍规律的四个方程。其中：

(1) 描述了电场的性质。在一般情况下，电场可以是库仑电场也可以是变化磁场激发的感应电场，而感应电场是涡旋场，它的电位移线是闭合的，对封闭曲面的通量无贡献。

(2) 描述了磁场的性质。磁场可以由传导电流激发，也可以由变化电场的位移电流所激发，它们的磁场都是涡旋场，磁感应线都是闭合线，对封闭曲面的通量无贡献。

(3) 描述了变化的磁场激发电场的规律。

(4) 描述了变化的电场激发磁场的规律。

在电磁场的实际应用中，经常要知道空间逐点的电磁场量和电荷、电流之间的关系。从数学形式上，就是将麦克斯韦方程组的积分形式化为微分形式。利用矢量分析方法，可得：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot D = \rho \quad (1-5) \\ \nabla \cdot B = 0 \quad (1-6) \\ \nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-7) \\ \nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-8) \end{array} \right.$$

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库